

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 Grundlagen

1.	Schwingungstechnik für die Automobilindustrie	1
1.1	Grundlagen und Anforderungen der Schwingungstechnik	1
1.2	Schwingungstechnik im Automobilbau	1
2.	Schwingungsisolation, Dämpfung und Tilgung	5
2.1	Ein Werkstoff wird berechenbar	5
2.2	Die Grundlagen der Schwingungsisolation	6
2.3	Vierpoltheorie: Eine Beschreibung zur Isolation hoher Frequenzen	9
2.3.1	Mechanische Impedanzen	9
2.3.2	Mechanische Vierpole	10
2.3.3	Kopplung von Vierpolen	12
2.3.4	Isolationsberechnung mit Vierpolen	14
2.3.4.1	Durchgangsdämmung	14
2.3.4.2	Durchgangsdämmung der Schnelle	14
2.3.4.3	Durchgangsdämmung der Kraft	15
2.3.4.4	Einfügungsdämmung	15
2.3.4.5	Beispiel: Dämpfer-Stützlager in einer Pkw-Radaufhängung	16
2.4	Einfluss von Dämpfung und Reibung auf die Isolation	18
2.4.1	Einführung	18
2.4.2	Zum Einfluss der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung	20
2.4.3	Zum Einfluss der Reibung	22
2.5	Die Schwingungstilgung	27
3.	Werkstoffe der Schwingungstechnik	29
3.1	Einführung	29
3.2	Elastomer – ein außergewöhnlicher Werkstoff	29
3.2.1	Energie-Elastizität	29
3.2.2	Entropie-Elastizität	30
3.3	Grundpolymer bzw. Kautschuk	30
3.3.1	Einführung	30
3.3.2	Naturkautschuk und Synthesekautschuk	30
3.4	Überblick über typische Materialeigenschaften	32
3.4.1	Einführung	32
3.4.1.1	NR – Naturkautschuk	32
3.4.1.2	IR – Polyisopren-Kautschuk	33
3.4.1.3	BR – Butadien-Kautschuk	33
3.4.1.4	SBR – Styrol-Butadien-Kautschuk	33
3.4.1.5	CR – Chloropren-Kautschuk	34
3.4.1.6	NBR – Nitril-Kautschuk	34
3.4.1.7	HNBR – Hydrierter Nitril-Kautschuk	34
3.4.1.8	IIR – Butyl-Kautschuk	35
3.4.1.9	EPDM – Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	35

3.4.1.10	ACM – Acrylat-Kautschuk	35
3.4.1.11	AEM –Ethylen- Acrylat-Kautschuk	36
3.4.1.12	FKM – Fluor-Kautschuk	36
3.4.1.13	ECO – Epichlorhydrin-Kautschuk	36
3.4.1.14	VMQ – Silikon-Kautschuk	37
3.4.1.15	AU und EU – Polyester- und Polyether-Urethan-Kautschuk	37
3.5	Naturkautschuk – Entdeckung, Geschichte, Eigenschaften, Verwendung	37
3.5.1	Einführung	37
3.5.2	Herstellungsverfahren und Eigenschaften des Rohkautschuks	41
3.5.3	TSR – technisch spezifizierter Kautschuk	44
3.5.4	Synthetischer „Naturkautschuk“	47
3.5.5	NR-Mischungen und Vulkanisate – typische Eigenschaften	48
3.5.6	Festigkeit - Verstärkung – Selbstverstärkung	49
3.5.7	Hitzebeständigkeit – Alterung	50
3.5.8	Kälteeigenschaften	50
3.5.9	Anwendungsgebiete	51
3.5.10	Zukunftsansichten	52
3.6	Gummimischung und Vernetzungsreaktion	53
3.6.1	Mischungsbestandteile	55
3.6.1.1	Einführung	55
3.6.1.2	Vernetzungssystem	56
3.6.1.3	Sonderfall Thermoplastische Elastomere (TPE)	56
3.6.1.4	Füllstoffe	57
3.6.1.5	Weichmacher	57
3.6.1.6	Alterungsschutzmittel	57
3.6.1.7	Verarbeitungshilfsmittel und Additive	58
3.6.1.8	Herstellung der Rohmischung	58
3.6.1.9	Prüfung und Freigabe	59
3.6.1.10	Vulkameterprüfung	60
3.7	Formgebung und Vulkanisation	62
3.7.1	Compression Moulding	63
3.7.2	Transfer Moulding	63
3.7.3	Injection Moulding	64
3.7.4	Gummi-Metall-Haftung	64
3.8	Elastomere für Schwingungstechnik – eine Übersicht	65
3.8.1	Alterungsbeständigkeit	67
3.8.2	Kältebeständigkeit	67
3.8.3	Grenzen der Einsatztemperatur	69
3.9	Bauteilgruppen – maßgeschneiderte Werkstoffe	69
3.9.1	Werkstoffe für Fahrwerkteile	69
3.9.2	Materialien für Federelemente und Karosseriehalter – Einsatzgebiete für MCU	72
3.9.3	Werkstoffe für Aggregatelagerung – Motoren- und Getriebelager	72
3.9.3.1	Werkstoffeigenschaften	73

3.9.3.2	Shore-Härte	75
3.9.3.3	Werkstoffe für Motorlagerung	76
3.9.4	Werkstoffe für Torsionsschwingungsdämpfer	78
3.9.5	Werkstoffe für Kupplungen und entkoppelnde Riemenscheiben	81
3.9.6	Werkstoffe für Tilger	83
3.9.7	Werkstoffe für Luftfedern	83
3.9.8	Zukunft der Elastomere in der Schwingungstechnik	85
3.10	Verbindungstechnik	85
3.10.1	Substrate für Elastomer-Verbund-Teile	85
3.10.1.1	Metalle	85
3.10.1.2	Kunststoffe	86
3.10.1.3	Metalle und Kunststoffe	87
3.10.2	Elastomere für den Verbund Gummi/Metall	88
3.10.3	Vorbehandlung der Substrate	88
3.10.3.1	Reinigungsverfahren	89
3.10.3.2	Strahlbehandlung	91
3.10.3.3	Phosphatierungs-Verfahren für Stahlteile	92
3.10.3.4	Konversions-Verfahren für Aluminium	97
3.10.4	Bindemittel für Elastomer-Verbundteile	99
3.10.4.1	Historische Entwicklung von Bindemitteln	99
3.10.4.2	Physikalisch-chemische Grundlagen der Bindung	100
3.10.4.3	Bindemittel-Hersteller und deren Produkte	102
3.10.4.4	Zukünftige Trends bei Bindemitteln	103
3.10.5	Mechanismus der Bindung	103
3.10.5.1	Zusammensetzung von Bindemitteln	103
3.10.5.2	Reaktionen der Bindemittel	104
3.10.5.3	Vorgänge bei der Vulkanisation	104
3.10.5.4	Vernetzungsreaktionen in Bindesystemen	104
3.10.6	Auftrag der Bindemittel	107
3.10.6.1	Auftragsverfahren	107
3.10.6.2	Messung der Schichtdicke von Bindemitteln	110
3.10.7	Prüfung der Bindung	113
3.10.7.1	Bindungsprüfung an Fertigteilen	113
3.10.7.2	Bindungsprüfung an Prüfkörpern	113
3.10.7.3	Zerstörungsfreie Prüfungen	114
3.10.8	Bruchbilder von Gummi-Verbundteilen	114
3.10.8.1	Typische Bruch- und Ausfallbilder	114
3.10.8.2	Mögliche Fehlerquellen	116
3.10.8.3	Schadensanalyse	116
4.	Vom Systemverständnis zum besseren Bauteil	117
4.1	Von der Systembeschreibung zur Bauteilspezifikation	117
4.2	Von der Spezifikation zum Bauteilkonzept	118
4.3	Die Bauteilkonstruktion	124
4.3.1	Die Tragkörpergestaltung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	124
4.3.2	Lebensdauervorhersage und Tragkörperoptimierung	125

4.3.3	Gewichtsreduktion durch automatische Konturoptimierung	128
5.	Bauteilfertigung	131
5.1	Der „Single-Loop“-Entwicklungsansatz	131
5.2	Von der Bauteilzeichnung zum Musterbau	133
5.2.1	Unterschiedliche Anforderungen von Bauteil- und Werkzeugkonstruktion	133
5.2.2	Füllbildsimulation	134
5.2.3	Das erste Muster	134
5.2.4	Der Fertigungsprozess	135
5.2.5	Fertigungsparameter	135
6.	Prüfungen in Zeiten von „Single Loop“	137
6.1	Betriebsfestigkeitsprüfung – Historie und Motivation	137
6.2	Betriebsfestigkeit von Elastomerlagern	138
6.3	Virtuelle Lebensdauerprüfung	139
6.4	Statistische Grundlagen	145
6.5	Prüfzeitverkürzung durch Omission	150
6.6	Bewertung des Temperatureinflusses	156
6.7	Fazit	157

Teil 2 Anwendungsfelder

7.	Aggregatelager	159
7.1	Aggregatelagersysteme	159
7.1.1	Ziele der Systemauslegung	159
7.1.2	Lagerungskonzepte	160
7.1.2.1	Grundprinzip der Funktionstrennung	160
7.1.2.2	Front-Querantrieb	160
7.1.2.3	Vierpunktllagerung	161
7.1.2.4	Pendellagerung	163
7.1.3	Standardantrieb	165
7.1.3.1	Dreipunktllagerung	165
7.1.3.2	Vierpunktllagerung	166
7.1.4	Werkzeuge zur Auslegung von Aggregatelagerungssystemen	166
7.1.4.1	Modellierung mit Mehrkörpersystemen	166
7.1.4.2	Fahrzeugversuch	174
7.1.5	Hinweise zur praktischen Auslegung von Lagerungssystemen	178
7.1.5.1	Auslegung der Statik	178
7.1.5.2	Auslegung der Eigenfrequenzen	179
7.1.5.3	Auslegung des Leerlaufes	180
7.1.5.4	Auslegung transienter Vorgänge	181
7.2	Grundlagen der Aggregatelager	182
7.2.1	Definition	182

7.2.2	Aufgaben der Aggregatelager	183
7.2.3	Elastomerfedern	185
7.2.4	Metall- und Kunststoffteile für Aggregatelager	189
7.2.5	Flüssigkeiten für Aggregatelager	192
7.3	Elastomere für Aggregatelager	192
7.3.1	Anforderungen an Elastomere und verwendete Arten	192
7.3.1.1	Anforderungen	192
7.3.1.2	Kautschukarten für Elastomere und ihre Eigenschaften	194
7.3.2	Dämpfung und dynamische Verhärtung	196
7.3.3	Setzen und Hochtemperaturverhalten	197
7.4	Elastomerlager	198
7.4.1	Drucklager	198
7.4.1.1	Rundlager	198
7.4.1.2	Rechtecklager	200
7.4.2	Buchsen	201
7.4.2.1	Innenringbuchse (IR-Buchse)	201
7.4.2.2	Außen und innen gebundene rotationssymmetrische Buchse	201
7.4.2.3	Buchsen als abgestimmte Lagerelemente	202
7.4.3	Symmetrische Schräglager (Dach- oder Keillager)	205
7.4.4	Zusammengesetztes Lager	206
7.4.5	Pendelstützen	208
7.4.6	Gummi/Metall-Sonderbauformen	211
7.5	Zielkonflikte von Elastomer-Lagerelementen	212
7.6	Hydraulisch dämpfende Motor- und Getriebelager	214
7.6.1	Einführung	214
7.6.2	Einfluss des Membranspiels auf die Dämpfung bei Entkopplung durch eine lose Membran	221
7.6.3	Optimierung der Akustik	222
7.6.4	Semi-entkoppelnde Düsen-Membransysteme	223
7.6.5	Kavitation	224
7.6.6	Lagerbeispiele	227
7.6.6.1	Anschlaglager	227
7.6.6.2	Drehmomente abstützendes Anschlag-Hydrolager .	231
7.6.6.3	Hydrolager mit Zuganschlagband	233
7.6.6.4	Kastenlager	234
7.6.6.5	Modernisiertes und kostenreduziertes Kastenhydrolager	236
7.6.6.6	Hängende Motorbefestigung (Hanglager)	237
7.7	Hydrobuchsen	240
7.8	Luftgedämpfte Lager	243
7.8.1	Einführung	243
7.8.2	Theorie der Luftdämpfung (praktischer Ansatz)	245
7.8.3	Vergleich zwischen Luftdämpfung und hydraulischer Dämpfung	246
7.8.4	Parameterstudie	248
7.8.4.1	Variation des pneumatischen Durchmessers	249

7.8.4.2	Variation des eingeschlossenen Luftvolumens	249
7.8.4.3	Variation der Anregungsamplituden	251
7.8.4.4	Variation des Düsendurchmessers	251
7.8.5	Schaltbare Lager	253
7.9	Schaltbare Motorlager	253
7.9.1	Elektrisch schaltbare Motorlager	253
7.9.2	Pneumatisch schaltbare Hydrolager	256
7.9.3	Schaltbare Lager mit automatischer Membranspielverstellung	260
7.10	Aktive Schwingungstechnik (Active Vibration Control)	262
7.10.1	Einführung	262
7.10.2	Geschichte	263
7.10.3	AVC-Systemoptionen	264
7.10.3.1	Open-Loop-Steuerung	265
7.10.3.2	Closed-Loop-Kontrolle	265
7.10.4	AVC-Systemkomponenten	266
7.10.4.1	Der Aktor (Optionen)	266
7.10.4.2	Der elektrodynamische Aktor	267
7.10.4.3	Die elektronische Steuereinheit (Electronic Control Unit, ECU)	268
7.10.4.4	Der „Fehler“-Sensor	268
7.10.5	Fallstudien	269
7.10.6	Ausblick	270
7.11	Antworten auf marktspezifische Anforderungen	271
7.11.1	Funktionsverbesserungen und Kostenreduktionen bei Aggregatelagern im Rahmen der Fahrzeugweiterentwicklung	271
7.11.2	Baukasten	274
7.11.2.1	Weiter entwickelter Baukasten aus einfachen und ungewöhnlichen Lösungen	274
7.11.3	Sonderlösungen, zugeschnitten auf spezielle Fahrzeuganforderungen	280
7.11.3.1	Hydrolager mit eingebautem Tilger	280
7.11.3.2	Hydrolager/hydraulisches Schaltlager mit Doppelisolator	281
7.11.3.3	Hydrolager mit automatischem, hydraulischem Leerlauftilger	282
7.11.3.4	Hydrolager mit Silikon-Tragfeder und lokaler Silikon-Schutzkappe	285
7.11.4	Innovation aktive Lager	287
7.12	Zusammenfassung	290
7.13	Leitsätze zur Konzeption von Aggregatelagern	291
8.	Fahrwerkslager	293
8.1	Fahrkomfort oder Fahrsicherheit	293
8.1.1	Das sportliche Fahrwerk	293
8.1.2	Die Definition des Fahrkomforts	294
8.1.3	Die Definition der Fahrsicherheit	294

8.2	Gummi/Metall-Teile im Fahrwerk	296
8.2.1	Gummi/Metall-Teile ermöglichen den Radfederhub	296
8.2.2	Gummi/Metall-Elemente ermöglichen wartungsfreie Achsen	298
8.2.3	Gummi/Metall-Teile steuern die Kinematik der Radführung	299
8.2.4	Gummi/Metall-Lager unterstützen anspruchsvolle Spezifikationen	300
8.2.5	Gummi/Metall-Lager absorbieren Stöße	302
8.2.6	Gummi/Metall-Elemente isolieren Schwingungen	304
9.	Nutzfahrzeuglager	309
9.1	Motorlager	309
9.1.1	Konstruktion	309
9.1.1.1	Systeme	309
9.1.1.2	Befestigung	310
9.1.1.3	Anschlüsse	310
9.1.1.4	Kennungen	311
9.1.1.5	Bauraum	311
9.1.1.6	Tragkörper	311
9.1.2	Material	312
9.1.2.1	Elastomere	312
9.1.2.2	Trägerwerkstoffe	313
9.1.2.3	Zusammenfassung	313
9.2	Fahrwerkslager	313
9.2.1	Fahrwerke mit Blattfederung (VA / HA)	313
9.2.2	Fahrwerke mit Luftfederung	315
9.3	Kabinenlager	317
9.3.1	Fahrerhauslager	317
9.3.2	Funktionsbeschreibung	318
9.3.3	Technische Anforderungen für die Bauteilentwicklung	318
9.3.4	Bauteilauslegung	318
9.3.5	Lebensdauer und Funktionalität	319
9.4	Sonderlager	319
9.4.1	Batteriekastenlager	319
9.4.1.1	Lasten und Anforderungen	319
9.4.1.2	Bauteilauslegung	320
9.4.1.3	Bauteilformen	320
9.4.2	Schaltkastenentkopplung	321
10.	Luftfedern	323
10.1	Die Anwendung von Luftfedern in der Fahrzeugtechnik	323
10.1.1	Anwendungsfelder	323
10.1.2	Vergleich verschiedener Federungssysteme für Pkw	324
10.1.2.1	Prinzip Luftfederersystem	324
10.1.2.2	Prinzip Niveaualage mit Zusatzluftfeder	325
10.1.2.3	Prinzip hydropneumatisches System	325
10.1.2.4	Prinzip Nivomat	326
10.1.2.5	Prinzip Verstellfahrwerk	327

10.1.2.6 Prinzip Active Body Control (ABC)	327
10.1.2.7 Prinzip Active Electromagnetic Body Control	328
10.1.3 Vorteile von Luftfeder systemen	328
10.1.4 Der Aufbau eines Luftfeder systems im Fahrzeug	329
10.1.5 Luftversorgungs anlage	330
10.1.5.1 Einführung	330
10.1.5.2 Steuergeräte für Luftfeder systeme	331
10.1.6 Geforderte Eigenschaften für Pkw-Luftfeder	332
10.2 Funktion und physikalische Grundlagen von Luftfeder	334
10.2.1 Das Gaspolster als Feder	334
10.2.2 Die Funktion des Luftfederbalges	335
10.2.3 Kraft und Federrate als Zielgrößen der Auslegung	337
10.2.4 Wie lässt sich die Kennlinie der Luftfeder beeinflussen?	338
10.3 Aufbau und Eigenschaften von Luftfederbälgen	340
10.3.1 Faltenbälge Typ 1B und 2B	340
10.3.2 Faltenbälge Typ 1A	341
10.3.3 Rollbälge	342
10.3.4 Schlauchrollbälge und deren Anbindung (Stecksitz, Bördeln, Verklemmung)	343
10.3.5 Die Fadenlage: Axial- und Kreuzlagenbälge im Vergleich	344
10.3.6 Balgeigenschaften und ihre Auswirkung im Fahrzeug	346
10.4 Aufbau und Konstruktion von Luftfeder	347
10.4.1 Federbein oder freistehende Luftfeder	347
10.4.2 Besondere Anforderungen und Ausführungen	349
10.4.3 Anwendungsbeispiel Pkw	351
10.4.4 Anwendungsbeispiel Nutzfahrzeug	353
10.4.5 Anwendungsbeispiel Schienenfahrzeug	353
10.5 Herstellung von Luftfeder	355
10.5.1 Aufbauelemente des Luftfederbalges	355
10.5.2 Halbfabrikate – Gummi, Gewebe	355
10.5.3 Wulsteinlagen	355
10.6 Festigkeitsträger	356
10.6.1 Nylonkordgewebe	356
10.6.2 Die Merkmale nach der Gewebespezifikation	356
10.6.3 Die Fadenkonstruktion	356
10.6.4 Auswahl der Fadenkonstruktion	357
10.6.5 Aufbau der Balgwand	357
10.6.6 Konstruktive Auslegung	358
10.7 Antworten auf marktspezifische Anforderungen	358
 11. Torsionsschwingungsdämpfer	361
11.1 Kurbeltrieb	361
11.1.1 Einführung	361
11.1.2 Rückblick	362
11.1.3 Bauarten von Gummi-Torsionsschwingungsdämpfern	363
11.1.3.1 Einführung	363
11.1.3.2 Eingepresste Torsionsschwingungsdämpfer	364
11.1.3.3 Vulkanisierte Torsionsschwingungsdämpfer	365

11.1.4	Auslegung von Torsionsschwingungsdämpfern	366
11.1.4.1	Einführung	366
11.1.4.2	Berechnungsmodell Mehrkörpersimulation	367
11.1.4.3	Lösung des Differentialgleichungssystems	368
11.1.4.4	Validierung des Berechnungsmodells	371
11.1.4.5	Bewertung der Ergebnisse	372
11.1.5	Ausblick	373
11.2	Entkoppelte Riemscheiben für Nebenaggregate	375
11.2.1	Einführung	375
11.2.2	Aufbau der entkoppelten Riemscheibe	377
11.2.3	Auslegung von entkoppelten Riemscheiben	377
11.2.3.1	Drehschwingungssystem Riementrieb	377
11.2.3.2	Auslegungskriterien	379
11.2.3.3	Validierung des Berechnungsmodells	381
11.2.4	Ausblick	382
12.	Tilger.	385
12.1	Lineartilger.	385
12.1.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete von Lineartilgern ..	385
12.1.1.1	Getriebetilger	386
12.1.1.2	Lenkradtilger / Airbagtilger	387
12.1.1.3	Chassis-Tilger / Cabriotilger	387
12.1.1.4	Aktive Tilger	388
12.1.1.5	Hydrotilger	389
12.1.2	Prinzipien zur Auslegung von Lineartilgern	390
12.1.2.1	Federsteifigkeit	391
12.1.2.2	Dämpfung	391
12.1.2.3	Gewicht der Schwungmasse	391
12.1.2.4	Resonanzfrequenz	393
12.1.3	Design und Aufbau von Lineartilgern	395
12.1.4	Antworten auf marktspezifische Anforderungen	397
12.2	Rotationstilger	397
12.2.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete von Rotationstilgern ..	397
12.2.2	Prinzipien der Auslegung von Rotationstilgern	398
12.2.3	Design und Aufbau von Rotationstilgern	399
12.2.4	Antworten auf marktspezifische Anforderungen	400
12.3	Komponenten zur Lagerung, Zentrierung und Momentenübertragung von Antriebswellen	401
12.3.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete	401
12.3.2	Prinzipien der Auslegung	401
13.	Polyurethane (PUR) als Feder- und Dämpfungswerkstoffe – Grundlagen	407
13.1	Einführung	407
13.2	Chemische Grundlagen	408
13.2.1	Isocyanate	408
13.2.2	Polyole	410

13.2.2.1	Polyether	410
13.2.2.2	Polyester	411
13.3	Katalysatoren	411
13.4	Vergleich	412
13.5	MCU-Elastomere im automobilen Einsatz	412
14.	Mikrozelluläres Polyurethan (MCU)	413
14.1	Grundsätze von MCU-Anwendungen	413
14.2	Entwicklungsbeispiele für automobile Komponenten	416
14.3	Vorhersage des Bauteilverhaltens mittels FEM (Finite-Elemente-Methode)	419
14.3.1	Poisson-Koeffizient	419
14.3.2	Analyse durch Polynom-Anpassung	419
14.4	Befestigungen für Karosserie und Radaufhängung	422
14.5	Anwendungsbeispiele für MCU	423
14.5.1	Geräuschdämmung	423
14.5.2	Stoßübertragbarkeit	425
14.5.3	Gewichtseinsparung	426
14.6	Zusammenfassung	426

Anhang

Kapitel- und Autorenverzeichnis	427
Abkürzungen	428
Literatur	430
Literaturnachweise	430
Weitere Literatur	432
Bildquellen	433
Sachverzeichnis	434